

UTILIZACIÓN DEL “DFOT HEAT PULSE METHOD” PARA EL ESTUDIO DEL BULBO MOJADO EN GOTEROS

M. Gil Rodríguez¹, L. Rodríguez Sinobas², J. Benítez Buelga³, R. Sánchez Calvo⁴, L. Juana Sirgado⁵, G. Castañón Lion⁶ y F. Laguna Viñuelas⁷.

¹ Departamento de Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, maria.gil@upm.es.

² Departamento de Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, leonor.rodriguez.sinobas@upm.es.

³ Departamento de Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, javier.benitez@upm.es.

⁴ Departamento de Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, raul.sanchez@upm.es.

⁵ Departamento de Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, luis.juana@upm.es.

⁶ Departamento de Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, guillermo.castanon@upm.es.

⁷ Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Ciudad Universitaria, 28040, Madrid. franciscovicente.laguna@upm.es

RESUMEN. Mediante el método “Distributed Fiber Optic Temperature Measurement” o DFOT, se determina la temperatura en intervalos de 12,5 cm y grandes distancias (hasta 10km), con una alta frecuencia temporal y una gran precisión. El “heat pulse method” consiste en aplicar un pulso de calor al suelo, con una determinada energía, y observar la evolución de la temperatura que depende, fundamentalmente, del contenido de humedad del suelo. La combinación de ambos métodos, denominada “DFOT heat pulse method”, permite conseguir medidas precisas del contenido de humedad del suelo.

Con objeto de estudiar experimentalmente la evolución de la forma y dimensiones del bulbo mojado y la distribución del agua en un emisor de riego por goteo, se construyó una columna de suelo de 0,5 m de radio y 0,6 m de altura. En el interior de la misma, se colocó la fibra óptica formando tres hélices concéntricas de diámetros 20, 40 y 60 cm, dando lugar a 148 puntos de medida. Antes, durante y tras la aplicación del riego se realizaron pulsos caloríficos con potencia de 20W/m. Se midió el contenido de humedad, a profundidades 10, 20, 30 y 40 cm, con una sonda capacitiva y se determinó gravimétricamente el contenido de humedad de muestras de suelo tomadas inmediatamente después del ensayo. Los ensayos apuntan al “DFOT heat pulse method” como herramienta útil para el estudio, en laboratorio, del bulbo mojado formado a partir de un gotero y ponen de manifiesto su potencial para el estudio del riego por goteo en campo.

ABSTRACT. By means of the Distributed Fiber Optic Temperature Measurement method or DFOT, the temperature in 12.5 cm intervals and long distances (up to 10 km) with a high time frequency and a great accuracy is determined. The heat pulse method consists on applying a known amount of heat to the soil and monitoring the temperature evolution which mainly depends on the soil moisture content. Both methods combination, DFOT heat pulse method, has allows very accurate soil moisture content measurements.

In order to experimentally study the wetting patterns shape and size and also the water distribution from a drip irrigation emitter, a soil column of 0.5 m of diameter and 0.6 m high was built. Inside the column fiber optic with a still sheet was placed forming three concentric helixes of diameters 20, 40 and 60 cm, leading to a 148 measurement points. Before, during and after the irrigation event, heat pulses were performed with electrical power of 20W/m. The soil moisture content was measured with a capacitive sensor at depths 10, 20, 30 and 40 cm and the soil moisture content was determined in several locations and depths by the gravimetric method in several samples taken right after the test. The results point out the DFOT heat pulse method as a useful tool for the wetting patterns from drip irrigation emitters study in laboratory and show a high potential for its use in the field.

1.- Introducción. Objetivos.

Aunque se conocen muchos métodos precisos para medidas de humedad puntuales, hasta hace muy poco, no existían métodos in situ para la medida del contenido de humedad a escala de metros o de kilómetros, importantes cuando pensamos a nivel de cuenca hidrográfica.

La fibra óptica ha sido muy utilizada en el área de las comunicaciones. Sin embargo, entre sus aplicaciones más recientes, destaca la de su uso para medir la temperatura incluso en grandes distancias (hasta 10 km) y con una alta frecuencia temporal, lo que ha abierto un amplio abanico de posibilidades muy importantes en el seguimiento medioambiental (Selker et al. 2006a; 2006b, Tyler et al. 2008; Westhoff et al., 2007; Freifeld et al., 2008). La precisión en la medida puede alcanzar $\pm 0,2^\circ\text{C}$ en una distancia de ± 25 cm.

El método utilizado en los ensayos explicados en esta comunicación es el denominado "Distributed Fiber Optic Temperature Measurement" (medida distribuida de la temperatura con fibra óptica) o DFOT, que consiste en emitir un impulso óptico con láser y medir en el tiempo la señal reflejada en diferentes puntos de la fibra. Este método se ha utilizado en el estudio de filtraciones de minas abandonadas (Selker et al. 2006a) y en proyectos relacionados con el cambio climático, como en el estudio del deshielo en glaciares y balances hídricos en pequeñas cuencas (Selker et al. 2006b).

Además, en medios porosos, se ha usado, con buenos resultados para la detección de rotura de diques en presas (Perzmaier et al. 2004a y 2004b) y para la detección de entrada de agua en vertederos urbanos con cubierta vegetal (Weiss, 2003b). Imhoff et al. (2006) en su revisión de técnicas de medidas de contenido de agua en el suelo destaca el uso del "DFOT heat pulse method" (método DFOT del pulso de calor).

El "heat pulse method" consiste en aplicar una fuente de energía al suelo monitorizándose la fluctuación de energía por uno o varios sensores paralelos (Bristow et al., 1994). La transmisión del calor dependerá de diversos factores como la densidad aparente del suelo, la mineralogía, el tamaño de las partículas y, fundamentalmente, del contenido de humedad del suelo (Shiozawa and Cambell 1990). El sensor de temperatura puede estar situado en la propia fuente de calor (sondas simples) (de Vries y Peck, 1958; Schiozawa y Cambell, 1990, Bristow et al. 1994), o ser uno o más sensores en las proximidades de la fuente (Lubimova et al., 1961; Jaeger, 1965; Larson, 1988; Campbell et al., 1991; Bristow et al., 1993, 1994).

La mayoría de los antecedentes que utilizan el "heat pulse method" se centran, primero, en calcular las propiedades térmicas a partir de la respuesta del suelo a un pulso de calor y luego relacionarlos con el contenido de humedad del

suelo. Otros, en cambio, han tratado de correlacionar el contenido de humedad con el aumento de la temperatura durante el calentamiento (Shaw y Baver, 1940; Youngs, 1956). La desventaja de estos últimos métodos es que se necesita una curva distinta de calibración que relaciona el contenido de humedad con el incremento de temperatura para cada tipo de suelo y para cada diseño del sensor.

El uso de "DFOT heat pulse method" se ha utilizado con éxito para predecir el movimiento del agua subsuperficial (Perzmaier et al., 2004b, 2006), aunque para la determinación del contenido de humedad, hasta hace poco, sólo eran capaces de distinguir entre suelo seco húmedo y saturado (Perzmaier et al., 2006; Weiss, 2003a), pero no tenían capacidad de distinguir entre pequeños cambios en el contenido de humedad (Weiss, 2003a). Trabajos más recientes muestran que el uso de análisis que ajustan el cambio de todos los datos de temperatura son mucho más robustos (Mortensen et al., 2006).

Recientemente, Sayde et al. (2010) han demostrado, en una columna de suelo en el laboratorio, la fiabilidad del "DFOF heat pulse method" para obtener medidas precisas del contenido de humedad del suelo a estas escalas y un amplio rango de contenidos de humedad. El error en la medida del contenido de humedad (volumétrico) fue menor del 10%. Este resultado se obtuvo usando un método nuevo: la integral con respecto al tiempo de la desviación de la temperatura.

$$T_{cum} = \int_0^{t_0} \Delta T dt .$$

T_{cum} es el incremento de temperatura acumulado durante el tiempo de integración t_0 (s) y ΔT ($^\circ\text{C}$) es el incremento de temperatura respecto a la temperatura anterior al pulso. T_{cum} es función de las propiedades del suelo y éstas crecen monótonamente con el contenido de humedad del suelo θ , puesto que aumenta la cantidad de calor que es conducida lejos de la sonda, reduciendo la integral para los pulsos de calor suficientemente largos. Por ello, existe una relación unívoca entre T_{cum} y θ para un suelo, potencia de pulso, tiempo de integración y características del cable de fibra óptica dados. Este trabajo de Sayde et al. confirma el gran potencial de este método de medida.

Los objetivos de esta comunicación son estudiar la evolución de la forma y dimensiones del bulbo mojado y la distribución del agua en el suelo de un emisor de riego por goteo en laboratorio mediante el "DFOT heat pulse method".

2.- Materiales y métodos.

Procedimiento experimental:

La unidad de DTS (Fig. 1) utilizada en este experimento (Ultima004 - Silixa LDT), una de las más potentes que existen en la actualidad, permite tomar datos con una alta frecuencia temporal (1s) y puede medir la temperatura cada 0,125 m a lo largo de la fibra.

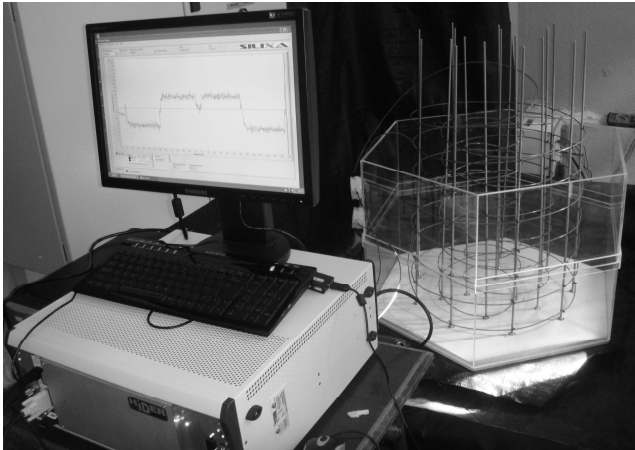


Fig. 1.- DTS y columna de metacrilato.

Para el ensayo, se construyó una columna de metacrilato de base hexagonal de diagonal 1 m y 0,6 m de alto (Fig. 1). En el interior de dicha columna se colocó el cable de fibra óptica del modelo BruSteel (Brugg Cable, Brugg) formando 3 hélices concéntricas de 20 cm, 40 cm y 60 cm de diámetro (Fig. 2).

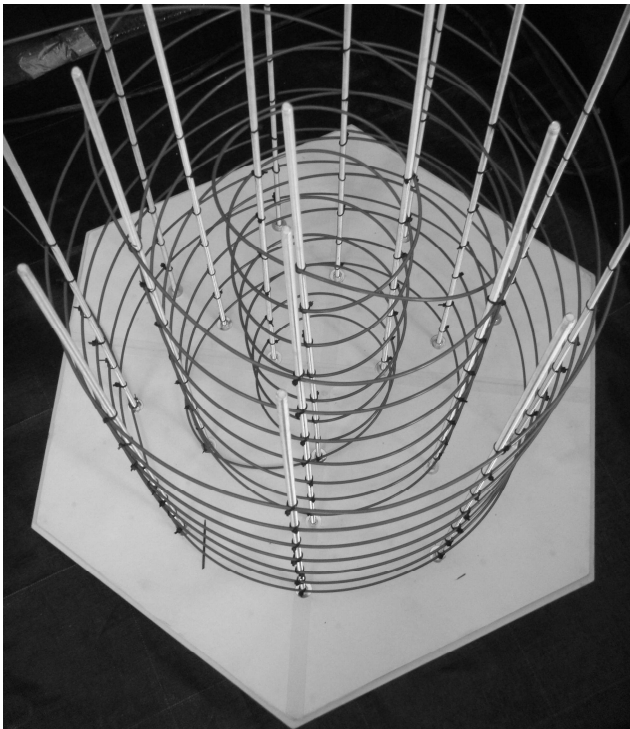


Fig. 2.- Hélices de fibra óptica

Después de situar las hélices en la columna, ésta se rellenó de suelo franco que se dejó secar al aire durante 4 semanas. El suelo se introdujo en la columna por capas controlando el volumen ocupado por un determinado peso del suelo mediante compactación para conseguir una densidad aparente de 1,5 g/cm³.

Se seleccionó un gotero compensante con caudal nominal de 2 L/h pinchado sobre una tubería que tomaba el agua desde una toma próxima (Fig. 3). La presión en dicha tubería se mantuvo constante, a 10 mca, durante las 5h 40min de riego. A lo largo del ensayo, se midió, de manera continua, la temperatura con la unidad de DTS cada 2s.

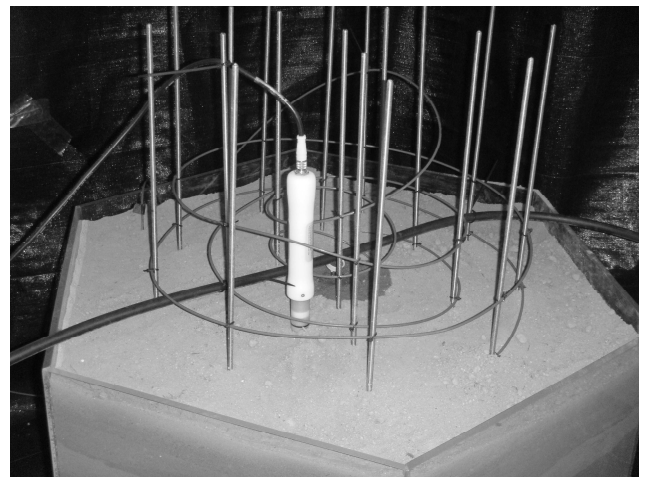


Fig. 3.- Detalle del sensor capacitivo de humedad y del ramal con gotero.

El cable está compuesto por cuatro fibras ópticas revestidas de un tubo capilar de acero inoxidable rodeado de filamentos también de acero inoxidable. Todo ello está recubierto de una gruesa cubierta de nylon para su protección. Dos de las fibras ópticas se conectaron entre sí de manera que la misma sección de cable era recorrida dos veces por el láser. A los componentes metálicos del cable, se les aplicó una diferencia de potencial para realizar los pulsos de calor cuya potencia se reguló con un auto-transformador conectado a la red eléctrica del laboratorio. La resistencia de dichos componentes (0,365 Ω /m), y según la ley de Joule, el cable se calentaba a razón de 20 w/m durante cada uno de los pulsos.

La zona cable que se calentaba tenía una longitud de 31m, de los cuales 20m estaban enterrados en el suelo formando una red tridimensional de 148 puntos de medida. Además, puesto que el láser circulaba por dos de las fibras del cable, cada uno de estos puntos se midió dos veces, y, para mayor precisión, se tomó la media de las dos medidas.

Para calibrar el DTS, se colocaron 30m de cable, que no se calentaron, en el interior de un baño de agua y hielo, asegurando una temperatura continua de 0°C.

La duración de los pulsos debe ser muy precisa, por lo que se instaló un temporizador digital de precisión $\pm 0.01\%$ programado para realizar pulsos de 2 minutos cada 20 minutos.

Se realizaron 21 pulsos: 4 antes del riego, 16 durante el riego y 1 inmediatamente después del riego.

Para la determinación gravimétrica del contenido de humedad, antes del ensayo se tomaron muestras de suelo con una barrena en una localización (suelo seco) a lo largo de todo el perfil del suelo para la determinación del contenido de humedad en laboratorio mediante el método gravimétrico. Asimismo, al finalizar el ensayo, se volvieron a tomar muestras de suelo con una barrena en 2 localizaciones más: una junto a la hélice de diámetro 20cm y otra junto a la hélice de 40cm de diámetro. Dicha determinación gravimétrica del contenido de humedad se realizó con un analizador de humedad (Moisture analyzer IR35, Denver Instrument).

Paralelamente, se midió el contenido de humedad a una distancia del gotero intermedia entre la primera y segunda hélices en continuo durante el ensayo mediante una sonda capacitiva (Profile probe PR2 – ΔT Devices LTD) a las profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm y 40 cm. La señal de esta sonda se registró, mediante una tarjeta de adquisición de datos, en el ordenador cada 2 s (Fig. 3). Este sensor mide el contenido de humedad volumétrico θ y sirvió para determinar, durante el ensayo, la profundidad a la que se encontraba el frente de avance.

Tratamiento de datos:

Los archivos generados por el DTS deben concatenarse formando una gran matriz para, a continuación, cortar los diferentes tramos (hélices) y extraer los pulsos.

El cálculo de la variable T_{cum} requiere un valor muy preciso de la temperatura antes del pulso de calor. Para ello, se hizo promedio la temperatura de los 5 minutos que precedían a cada pulso.

A continuación, el valor de T_{cum} se calculó integrando el período de calentamiento de los pulsos, 120s. Para ello, se calculó el incremento de temperatura durante dicho período de calentamiento (ΔT_{120s}) y se calculó el área encerrada bajo la curva.

3.- Resultados y discusión.

La Fig. 4 muestra la diferencia observada en los pulsos de calor a lo largo del tiempo. Tal y como se esperaba, a medida que el contenido de humedad fue aumentando en el suelo. Consecuentemente, T_{cum} o, lo que es lo mismo, el área encerrada bajo la curva desde la temperatura inicial a la

que se encontraba el suelo, también disminuye al aumentar la humedad, dado que el suelo aumenta menos su temperatura al aumentar su contenido de agua.

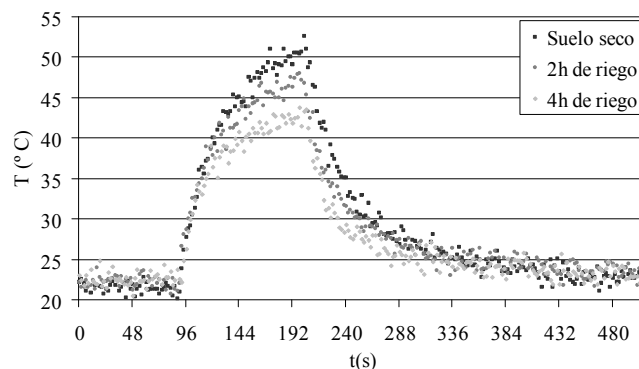


Fig 4. Ejemplos de pulsos de calor

Las Fig. 5 y 6 permiten comparar, antes y después del riego respectivamente, la variación de T_{cum} en el perfil (5a y 6a) con la variación en el perfil de suelo el contenido de humedad medido las muestras de suelo extraídas (5b y 6b). Tal y como era esperable se observa una gran similitud en la variación de ambas variables. Las desviaciones observadas podrían deberse a posibles asimetrías de la forma bulbo en profundidad; no obstante, en superficie se observó una superficie mojada circular durante todo el riego.

Se observa el avance del bulbo húmedo a lo largo del perfil del suelo durante el riego. Con las hélices de 20 cm y 40 cm de diámetro se detectó agua hasta más de 35 cm de profundidad, en cambio, no se detectó una diferencia significativa en el valor de T_{cum} calculado para la hélice de diámetro 60cm.

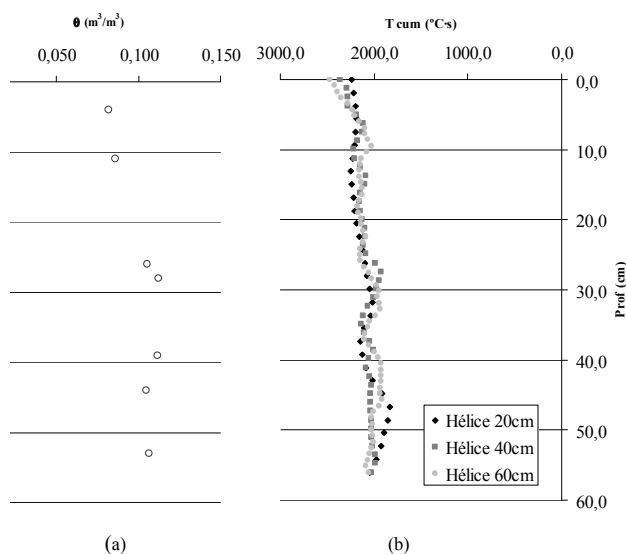


Fig. 5.- Situación antes del riego.

(a) Variación del contenido de humedad del suelo con la profundidad. (b) Variación de T_{cum} con la profundidad.

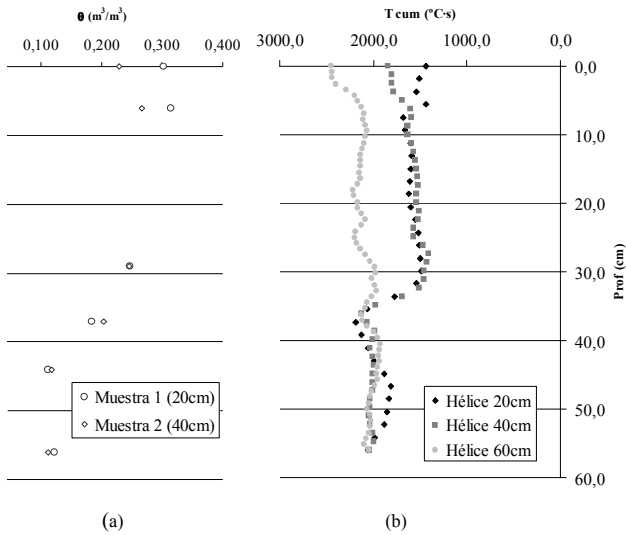


Fig. 6.- Situación tras el riego.

- (a) Variación del contenido de humedad del suelo con la profundidad.
(b) Variación de T_{cum} con la profundidad.

Este avance del agua en el suelo pudo comprobarse también con los valores medidos por el sensor de humedad que, justamente, medía hasta los 40cm.

En la figura 7 se puede observar la buena correlación ($R^2 = 0,993$) entre el contenido de humedad volumétrico θ y la variable T_{cum} . Esta relación se ha ajustado a una función logarítmica.

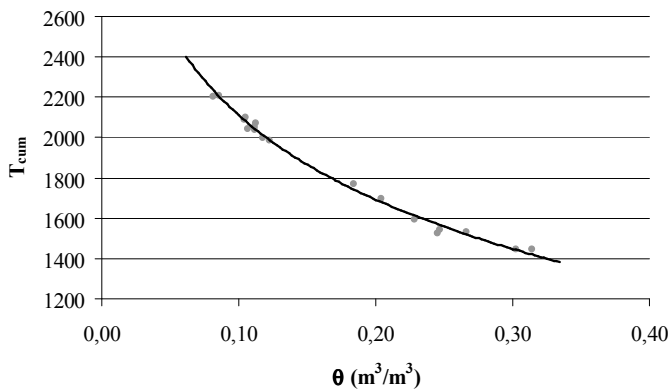


Fig. 7.- Relación entre T_{cum} y el contenido de humedad volumétrico.

Una vez conocida esta relación θ - T_{cum} , se pueden calcular los contenidos de humedad de todos los puntos y en todos los instantes.

A modo ilustrativo, la Fig. 8 representa el bulbo húmedo en varios instantes del riego. Para mayor simplicidad, se ha representado bidimensionalmente, bajo el supuesto bulbo húmedo simétrico. La representación tridimensional, en la que se está trabajando, permitirá detectar asimetrías y vías preferenciales del agua.

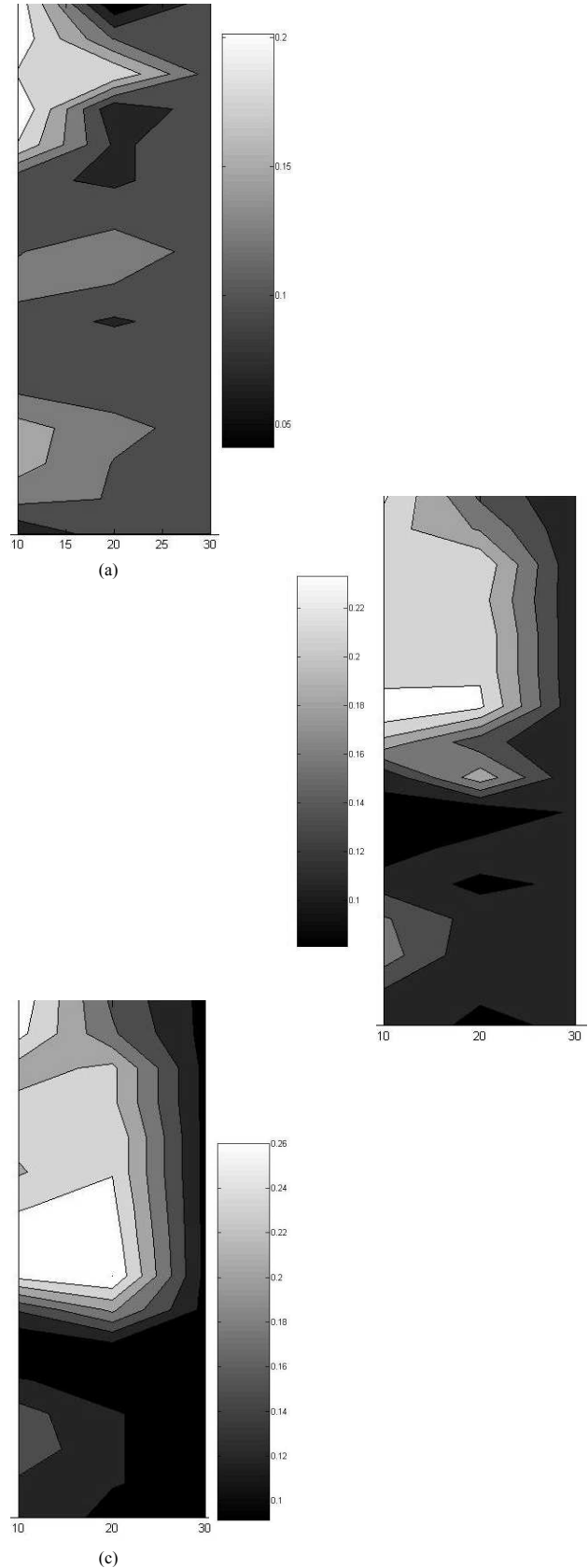


Fig. 8.- Algunos ejemplos de la distribución de θ en los bulbos.
(a) Tras 2h de riego. (b) Tras 4h de riego. (c) Al terminar el riego (5h 40min).

4.- Conclusiones.

La metodología DFOT heat pulse method puede ser utilizada para estudiar el movimiento del agua en un emisor de riego por goteo. Se pueden distinguir la forma y dimensiones del bulbo mojado, información que podría ser utilizada para la selección de variables de proyecto de riego, como la separación entre goteros, y variables de operación, como el tiempo de riego.

Se ha obtenido la relación unívoca entre la variable T_{cum} y el contenido de humedad θ para el suelo estudiado. Con ella, se puede medir el contenido de agua a lo largo del perfil de suelo que rodea a las hélices de fibra óptica en cualquier instante. Cada valor del contenido de humedad será el valor medio correspondiente a 12,5 cm de fibra óptica.

5.- Referencias.

- Bristow, K. L., Campbell, G. S., and Calissendorff, C. 1993. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:930-4.
- Bristow, K. L., R. D. White, and G. J. Kluitenberg. 1994. Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating. *Australian Journal of Soil Research*, 32:447-464.
- Campbell, G. S., Calissendorff, K., and Williams, J. H. 1991. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 291-3.
- de Vries, D. A., y Peck, A. J. 1958. On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils. Part I. Extension of theory and discussion of probe characteristics. *Aust. J. Phys.*, 11: 255-71
- Freifeld, B.M., Finsterle, S., Onstott, T.C., Toole, P., Pratt, M. 2008. Ground surface temperature reconstructions: Using in situ estimates for thermal conductivity acquired with a fiber-optic distributed thermal perturbation sensor. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L14309, DOI:10.1029/2008GL034762.
- Hopmans, J. W., J. Simunek, and K. L. Bristow. 2002. Indirect estimation of soil thermal properties and water flux using heat pulse probe measurements: Geometry and dispersion effects. *Water Resources Research* 38(1), DOI 10.1029/2000WR000071.
- Imhoff, P.T., D.R. Reinhart, M. Englund, Guérin, N. Gawande, B. Han, S. Jonnalagadda, T. G. Townsend and R. Yazdani. 2006. Review of state of the art methods for measuring water in landfills. *J. Waste Management*. 27 (6): 729-745.
- Jaeger, J. C. 1965. Application of the theory of heat conduction to geothermal measurements. In 'Terrestrial Heat Flow.' (Ed. W. H. K. Lee.) *American Geophysical Union Monograph*. Vol. 8, pp. 7-23.
- Larson, T. H. 1988. Thermal measurement of soils using a multineedle probe with a pulsed point-source. *Geophysics*, 53:266-70.
- Lubimova, H. A., Lusova, L. M., Firsov, F. V., Starikova, G. N. and Shushpanov, A. P. 1961. Determination of surface heat flow in Mazesta (USSR). *Annali di Geophys. XIV*, 157-67.
- Mortensen, A.P., Hopmans, J.W., Mori, Y., and Simunek, J. 2006. Multi-Functional heat pulse probe measurements of coupled vadose zone flow and transport. *Adv. Water Resour.* 29:250-267.
- Perzmaier, S., Aufleger, M., and Conrad, M. 2004a. Distributed fibre optic temperature measurements in hydraulic engineering. - Prospects of the heat-up method. In: *Proceedings of the 72nd ICOLD Annual Meeting - Workshop on Dam Safety Problems and Solutions-Sharing Experience, Seoul, South Korea, May 16-22, 2004, Korean National Committee on Large Dams (KNCOLD), Seoul.*
- Perzmaier, S., K.H. Straßer, T. Ströbl y M. Aufleger 2004b. Integral seepage monitoring on open channel embankment dams by the DFOT heat pulse method. *Proceedings of the 72 Annual Meeting de la Int. Commission on Large Dams (ICOLD) celebrado en Seoul, Korea, 16 al 22 de mayo de 2004, pag.17.*
- Perzmaier, S., Straßer, K.-H., Ströbl, Th., and Aufleger, M. 2006. Integral Seepage Monitoring on Open Channel Embankment Dams by the DFOT Heat Pulse Method. *22nd ICOLD, Barcelona. Q. 86 – R. 12*
- Sayde, C., C. Gregory, M. Gil-Rodríguez, N. Tuffillaro, S. Tyler, N. van de Giesen, M. English, R. Cuenca and J. Selker. 2010. Feasibility of soil moisture monitoring with fiber optics. *Water Resources Res.* vol. 46, W06201, DOI:10.1029/2009WR007846.
- Selker, J.S, Nick van de Giesen, Martijn Westhoff, Wim Luxemburg and Marc B. Parlange. 2006a. Fiber optics opens window on stream dynamics. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, 124401, DOI:10.1029/2006gl027979.
- Selker, J.S. Luc The'venaz, Hendrik Huwald, Alfred Mallet, Wim Luxemburg, Nick van de Giesen, Martin Stejskal, Josef Zeman, Martijn Westhoff and Marc B. Parlange. 2006b. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water resources research*, vol. 42, w12202, DOI:10.1029/2006WR005326.
- Shaw, B. and L.D. Baver. 1940. An electrothermal method for following moisture changes on the soil in situ. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 4:78-83
- Shiozawa, S., and G.S. Campbell. 1990. Soil thermal conductivity. *Remote Sens. Rev.*, 5:301-310.
- Tyler, S., Burak, S., McNamara, J., Lamontagne, A., Dozier, J., Selker, J. 2008. Spatially Distributed Temperatures at the Base of Two Mountain Snowpacks Measured with Fiber Optic Sensors. Under review for publication in the Journal of Glaciology.
- Weiss, J. D. 2003a. Distributed fiber optic moisture intrusion sensing system. *US Patent 6581445*.
- Weiss, J. D. 2003b. Using Fiber Optics to Detect Moisture Intrusion into a Landfill Cap Consisting of a Vegetative Soil Barrier. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 53:1130-1148.
- Westhoff, M.C., Savenije, H. H. G., Luxemburg, W. M. J., Stelling, G. S., van de Giesen, N. C., Selker, J. S., Pfister, L., and Uhlenbrook, S. 2007. A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11:1469-1480.
- Youngs, E.G. 1956. A laboratory method of following moisture content changes. *Trans. 6th Int. Congr. Soil Sci., Paris I:89-93*.